

DOI: 10.3901/JME.2023.14.320

# 变截面圆弧形流管无阀压电泵的理论及试验研究\*

严秋锋<sup>1</sup> 孙婉婷<sup>2,3</sup> 王红梅<sup>1</sup>

(1. 南通大学电气工程学院 南通 226019;

2. 香港理工大学工程学院 香港 999077;

3. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150006)

**摘要:** 哥氏力会对圆弧形流管中流动的流体产生促进或阻碍作用,同时结合扩张/收缩流管提出一种变截面圆弧形流管无阀压电泵。通过分析流体在圆弧形流管中顺、逆时针的流动特性,建立流体顺、逆时针流动的速度差公式。以圆弧形流管无阀压电泵为基础,阐明变截面圆弧形流管无阀压电泵的工作原理,并建立泵流量方程。利用3D打印技术分别制作圆弧形流管无阀压电泵和变截面圆弧形流管无阀压电泵,并进行泵流量试验研究。试验结果表明,两种压电泵的输出流量都随电压的增加而增加;驱动电压保持 $300 V_{p-p}$ 不变,圆弧形流管无阀压电泵在驱动频率为10 Hz时泵流量最大,为1.76 mL/min;变截面圆弧形流管无阀压电泵在驱动频率为14 Hz时泵流量最大,达到7.2 mL/min;与圆弧形流管无阀压电泵相比,变截面圆弧形流管无阀压电泵的平均输出流量提高了235%,变截面圆弧形流管无阀压电泵的泵流量随着圆弧半径的增加而增加。泵的输出流量源自地球自转产生的哥氏力,泵流量的大小能够反映所处位置地球的转速,有望通过泵流量的测量来获得本地位置,为新型导航装置的研制奠定基础。

**关键词:** 无阀;压电泵;变截面;圆弧形流管;流量

**中图分类号:** TH35; TH38

## Theoretical and Experimental Studies on Valve-less Piezoelectric Pump with Variable Cross Section Arc-shaped Tubes

YAN Qiufeng<sup>1</sup> SUN Wanting<sup>2,3</sup> WANG Hongmei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019;

2. Faculty of Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077;

3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** Coriolis force can promote or hinder the fluid flowing in the circular arc-shaped tubes. Simultaneously, combined with the nozzle/diffusers flow tube, a valve-less piezoelectric pump with variable cross section arc-shaped tubes (VPPVCSAT) is proposed. According to the flow characteristics of liquid in circular arc-shaped tubes, the velocity difference model of piezoelectric pump is established. Based on valve-less piezoelectric pump with arc-shaped tubes (VPPAT), the working principle of VPPVCSAT is expounded, and the pump flow equation is established. By using 3D printing technology, VPPAT and VPPVCSAT were made, and the experimental research was carried out. The experimental results show that, with the increase of voltage, the output flow of VPPAT and VPPVCSAT are increased. When the driving is  $300 V_{p-p}$  and the driving frequency is 10 Hz, the output flow of VPPAT reaches the maximum value of 1.76 mL/min. While the driving is  $300 V_{p-p}$  and the driving frequency is 14 Hz, the output flow of VPPVCSAT reaches the maximum value of 7.2 mL/min. Compared with VPPAT, the average output flow of VPPVCSAT is increased by 238%. The output flow of VPPVCSAT is increases with the increase of arc radius. The output flow is generated from the Coriolis force of the Earth's rotation, and the rotational speed of the location of pump can be reflected by the amplitude of the flow. Therefore, local geographical information can be acquired by measuring the Earth's rotational speed, forming a new principle of navigation.

\* 国家自然科学基金资助项目(41901269)。20220131 收到初稿, 20221122 收到修改稿

**Key words:** valve-less; piezoelectric pump; variable cross section; arc-shaped tubes; flow

## 0 前言

压电泵根据内部有无“阀”结构可以分为有阀压电泵<sup>[1-3]</sup>和无阀压电泵<sup>[4-6]</sup>。有阀压电泵在频率达到某一水平时,将会出现“泵阀滞后性”<sup>[7]</sup>的现象,导致流量迅速降为零,严重制约着有阀压电泵的推广。而无阀压电泵是依靠正、反流阻差来实现“阀”的功能,进而使液体产生单向流动,避免了“泵阀滞后性”,深受广大学者的关注。

1993 年,STEMME 等<sup>[8]</sup>在 SMITH 动态被动阀<sup>[9]</sup>的基础上提出了人类历史上的第一只无阀压电泵—锥形流管无阀压电泵,使压电泵的研究进入了“无阀时代”。研究人员基于 STEMME 等人的研究成果,后续对锥形流管无阀压电泵的性能、结构和优化方面进行了大量的研究和探索<sup>[10-13]</sup>。此外,压电泵的结构设计在无阀压电泵的研究中具有重要的作用,通常可以将无阀压电泵分为:外置流管式无阀压电泵、内置结构式无阀压电泵和仿生式无阀压电泵等<sup>[5]</sup>。其中,外置流管式无阀压电泵种类最多、发展时间最长,主要包括 Y 形流管无阀压电泵<sup>[14-15]</sup>、锥形流管无阀压电泵<sup>[4]</sup>、螺旋形流管无阀压电泵<sup>[16-17]</sup>和特殊流管无阀压电泵<sup>[18-19]</sup>等;内置结构式无阀压电泵主要包括:非对称坡面腔底无阀压电泵<sup>[20-21]</sup>、锥形螺旋泵腔无阀压电泵<sup>[22]</sup>和半球缺阻流体无阀压电泵<sup>[23-24]</sup>等;仿生式压电泵主要包括:仿鱼尾式无阀压电泵<sup>[25-26]</sup>和内置柔顺结构无阀压电泵<sup>[27-28]</sup>等。无阀压电泵的具体分类见图 1。



图 1 无阀压电泵的分类

张建辉团队借助哥氏力对顺时针方向流动的流体有阻碍作用和逆时针方向流动的流体有促进作用的原理,发明了由不对称斜线流管和平面螺旋线流管构造进出流管的单螺旋线形无阀压电泵<sup>[19-20]</sup>,为无阀压电泵在导航制导领域的应用奠定基础,拓展了无阀压电泵的应用范围。但是,螺旋线形流管为阿基米德曲线,形状复杂不易加工。因此,张建辉团队又进行了进一步探索,提出了圆弧形流管无阀压电泵<sup>[29]</sup>,但前期的研究只是证明了在一定频率内,圆弧形流管无阀压电泵会产生压差,并未对该类压电泵进行深入研究。同时,压电泵为装配式的,尺寸较大,且试验时容易引起内部流体泄漏,影响测量结果。

因此,本文结合圆弧形流管和锥形流管的特点,提出一种变截面圆弧形流管无阀压电泵。分析变截面圆弧形流管无阀压电泵的工作原理,建立泵流量方程。利用 3D 打印技术制作了圆弧形流管无阀压电泵和变截面圆弧形流管无阀压电泵,并对它们进行了试验研究。试验结果表明,与圆弧形流管无阀压电泵相比,变截面圆弧形流管无阀压电泵的泵流量具有显著提升,有助于该类压电泵在导航装置的应用。

## 1 流动特性分析

为了分析流体在圆弧形流管中的正、反向流动特性,建立了图 2 所示的柱坐标系及控制方程。几何模型的研究对象为平面圆弧曲线,则该圆弧的曲线方程为  $R=2a\cos\theta$ ,其中  $R$  为平面圆弧曲线的半径, $a$  为基圆半径, $\theta$  为平面圆弧流管的转角。

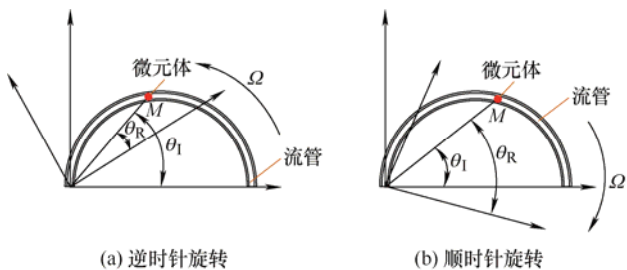


图 2 流体在圆弧形流管中的流动示意图

为了便于分析,设流体为正压的、均匀不可压缩的、无黏性的理想流体,则根据流体力学基本方程和圆弧形流管的几何特性在柱坐标系 $(r, \theta, z)$ 中可以将理想流体的微分方程表示如下<sup>[29]</sup>

$$\begin{cases} \frac{du_I}{dt_I} - \frac{v_I^2}{r_I} = -\frac{\partial P_I}{\partial r_I} \\ \frac{dv_I}{dt_I} + \frac{u_I v_I}{r_I} = -\frac{1}{r_I} \frac{\partial P_I}{\partial \theta_I} \\ \frac{dw_I}{dt_I} = -\frac{\partial P_I}{\partial z_I} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $I$  表示惯性参考系中的量,  $(u, v, w)$  分别为沿柱坐标  $(r, \theta, z)$  三个坐标轴方向的速度分量。其中

$$P_I = \frac{P}{\rho} + gz \quad (2)$$

在研究圆弧型流管中流体时将其看成微元体来研究。假定微元体位置不变, 则可以看成是原来的柱坐标系发生了旋转, 产生了一个绕  $z$  轴以角速度  $\Omega$  旋转的新柱坐标系。如图 2a 所示, 当柱坐标系逆时针旋转时, 旋转的柱坐标系  $(r_R, \theta_R, z_R)$  与原坐标系  $(r_I, \theta_I, z_I)$  的关系如下

$$\begin{cases} r_R = r_I = r \\ \theta_R = \theta_I - \Omega t_I \\ z_R = z_I = z \\ t_R = t_I = t \end{cases} \quad (3)$$

当  $t=0$  时, 上述两个坐标系重合。此时, 在旋转坐标系  $(r_R, \theta_R, z_R)$  坐标轴上的流速分量分别为

$$\begin{cases} u_R = \frac{dr_R}{dt_R} = \frac{dr_I}{dt_I} = u_I = u \\ v_R = \frac{d(r_R \theta_R)}{dt_R} = \frac{d(r_I \theta_I - r_I \Omega t_I)}{dt_I} = v_I - \Omega r \\ w_R = \frac{dw_R}{dt_R} = \frac{dw_I}{dt_I} = w_I = w \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)和(4)代入到式(1), 且  $dr/dt=u$ , 由此可以得到旋转坐标系中流体的运动方程为

$$\begin{cases} \frac{du_R}{dt_R} - \frac{v_R^2}{r_R} - 2\Omega v_R - \Omega^2 r_R = -\frac{\partial P_I}{\partial r_R} \\ \frac{dv_R}{dt_R} + \frac{u_R v_R}{r_R} + 2\Omega u_R = -\frac{1}{r_R} \frac{\partial P_I}{\partial \theta_R} \\ \frac{dw_R}{dt_R} = -\frac{\partial P_I}{\partial z_R} \end{cases} \quad (5)$$

因为  $du_R/dt_R=0$ , 对  $v$  进行分析省略下标, 根据式(5)中的第一个式子可以得到关于  $v$  的方程为

$$v^2 + 2\Omega r v + \Omega^2 r^2 = \frac{\partial P_I}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \quad (6)$$

考虑到速率取值是有意义的, 取

$$v_1 = -2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_I}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \quad (7)$$

同理, 如图 2b 所示, 当坐标系顺时针旋转时, 旋转的柱坐标系  $(r_R, \theta_R, z_R)$  与原坐标系  $(r_I, \theta_I, z_I)$  的关系如下

$$\begin{cases} r_R = r_I = r \\ \theta_R = \theta_I + \Omega t_I \\ z_R = z_I = z \\ t_R = t_I = t \end{cases} \quad (8)$$

此时可以推导出关于  $v$  的方程为

$$v^2 - 2\Omega r v + \Omega^2 r^2 = \frac{\partial P_I}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \quad (9)$$

考虑到速率取值是有意义的, 取

$$v_2 = 2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_I}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \quad (10)$$

由此可以得到坐标系顺、逆时针旋转时产生的速度差为

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 4a\Omega \cos \theta \quad (11)$$

由式(7)和(10)可知, 由于科氏项  $2a\Omega \cos \theta$  的存在, 导致流体在半圆弧型流管中顺、逆时针流动时产生一个差值  $4a\Omega \cos(\theta)$ , 进而引起流量的变化。

## 2 工作原理及泵流量分析

### 2.1 工作原理

图 3 为圆弧型流管无阀压电泵的工作原理。在图 3a 中, 当压电振子向上振动时, 泵腔容积增大, 内部压强减小, 泵腔处于吸程阶段, 流体分别从流管 A、B 流入泵腔内部。此时, 流体由流管 A 逆时针流入泵腔, 哥氏力对其起促进作用; 从流管 B 顺时针流入泵腔, 哥氏力对其起阻碍作用。因此, 由流管 A 流入泵腔的流量大于从流管 B 流入的流量, 即  $Q_{linA} > Q_{linB}$ 。

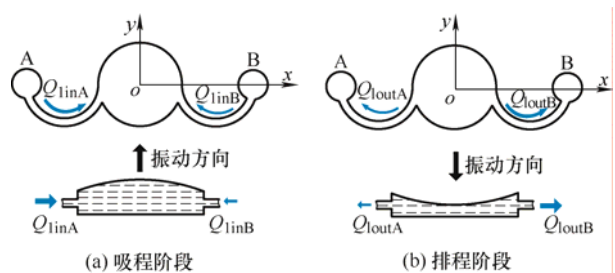


图 3 圆弧型流管无阀泵的工作原理

在图 3b 中, 当压电振子向下振动时, 泵腔容积减小, 内部压强增大, 泵腔处于排程阶段, 流体分别从流管 A、B 流出泵腔。此时, 流体由流管 A 顺时针流出泵腔, 哥氏力对其起阻碍作用; 从流管 B 逆时针流出泵腔, 哥氏力对其起促进作用。因此, 由流管 A 流出泵腔的流量小于从流管 B 流出的流量, 即  $Q_{1outA} < Q_{1outB}$ 。

在一个周期内, 由流管 A 产生的流量差

$$\Delta Q_{1A} = Q_{1inA} - Q_{1outA} \quad (12)$$

由流管 B 产生的流量差

$$\Delta Q_{1B} = Q_{1inB} - Q_{1outB} \quad (13)$$

此时, 一个周期内压电泵产生的总流量

$$\Delta Q_1 = Q_{1A} - Q_{1B} \quad (14)$$

图 4 为变截面圆弧形流管无阀压电泵的工作原理。在分析时, 可以将变截面圆弧形流管看成是圆弧形流管和锥形流管的组合。

在图 4a 中, 当压电振子向上振动时, 泵腔容积增大, 内部压强减小, 泵腔处于吸程阶段, 流体分别从流管 A、B 流入泵腔内部。此时, 流体由流管 A 逆时针流入泵腔, 哥氏力对其起促进作用, 同时, 流体流动的方向为锥形流管的扩张方向, 阻力较小; 从流管 B 顺时针流入泵腔, 哥氏力对其起阻碍作用, 同时, 流体流动的方向为锥形流管的收缩方向, 阻力较大。因此, 由流管 A 流入泵腔的流量大于从流管 B 流入的流量, 即  $Q_{2inA} > Q_{2inB}$ 。

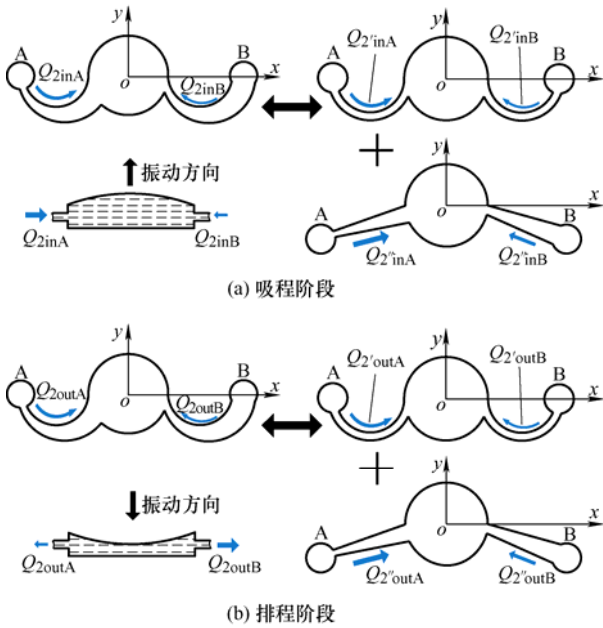


图 4 变截面圆弧形流管无阀泵的工作原理

在图 4b 中, 当压电振子向下振动时, 泵腔容积减小, 内部压强增大, 泵腔处于排程阶段, 流体分

别从流管 A、B 流出泵腔。此时, 流体由流管 A 顺时针流出泵腔, 哥氏力对其起阻碍作用, 同时, 流体流动的方向为锥形流管的收缩方向, 阻力较大; 从流管 B 逆时针流出泵腔, 哥氏力对其起促进作用, 同时, 流体流动的方向为锥形流管的扩张方向, 阻力较小。因此, 由流管 A 流出泵腔的流量小于从流管 B 流出的流量, 即  $Q_{2outA} < Q_{2outB}$ 。

在一个周期内, 由流管 A 产生的流量差

$$\Delta Q_{2A} = Q_{2inA} - Q_{2outA} \quad (15)$$

由流管 B 产生的流量差

$$\Delta Q_{2B} = Q_{2inB} - Q_{2outB} \quad (16)$$

此时, 一个周期内压电泵产生的总流量

$$\Delta Q_2 = Q_{2A} - Q_{2B} \quad (17)$$

## 2.2 泵流量方程的建立

(1) 建立关于圆弧形流管引起的泵流量方程。

根据前面计算得到的柱坐标系旋转的速度可以得到流体在圆弧形流管中顺、逆时针流动的速度分别为

$$v_c = 2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_l}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \quad (18)$$

$$v_a = 2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_l}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \quad (19)$$

式中,  $a$  为圆弧形流道基圆半径;  $\Omega$  为流体流动的角速度;  $v_c$  为流体顺时针流动的速度;  $v_a$  为流体逆时针流动的速度。

在压电泵的吸程阶段, 流体从流管 A 流入泵腔的流体流量为

$$Q_{YinA} = S \int \left[ 2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_l}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \right] dt \quad (20)$$

式中,  $S$  为圆弧形流道的截面面积;  $t$  为流体流动的时间。

同理, 流体从流管 B 流入泵腔的流体流量为

$$Q_{YinB} = S \int \left[ -2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_l}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \right] dt \quad (21)$$

式中,  $S$  为圆弧形流道的截面面积;  $t$  为流体流动的时间。

在压电泵的排程阶段, 流体从流管 A 流出泵腔的流体流量为

$$Q_{YoutA} = S \int \left[ -2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_l}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \right] dt \quad (22)$$

同理, 流体从流管 B 流出泵腔的流体流量为



$$Q_{YoutB} = S \int \left[ 2a\Omega \cos \theta + \sqrt{\frac{\partial P_l}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}} \right] dt \quad (23)$$

因此, 由流管 A 产生的流量差

$$\Delta Q_{YA} = Q_{YinA} - Q_{YoutA} = 4aS\Omega \int \cos \theta dt \quad (24)$$

由流管 B 产生的流量差为

$$\Delta Q_{YB} = Q_{YinB} - Q_{YoutB} = -4aS\Omega \int \cos \theta dt \quad (25)$$

综上所述, 在一个振动周期内压电泵产生的流量为

$$\Delta Q_Y = \Delta Q_{YA} - \Delta Q_{YB} = 8aS \sin(\Omega t) \quad (26)$$

(2) 建立关于锥形流管引起的流量方程。根据文献[30]可知, 锥形流管无阀压电泵的泵流量方程为

$$Q_Z = \Delta V_Z f \frac{\xi_d - \xi_n}{\xi_d + \xi_n} \quad (27)$$

式中,  $\Delta V_Z$  为泵腔的容积变化,  $f$  为压电振子的驱动频率,  $\xi_d$  为扩张管的流阻系数,  $\xi_n$  为收缩管的流阻系数。

综上所述, 圆弧形流管无阀压电泵的流量公式为

$$\Delta Q_1 = 8aS \sin(\Omega t) \quad (28)$$

变截面圆弧形流管可以看成是圆弧形流管与锥形流管的组合, 锥形流管在流体的单向流动中起促进作用。因此, 变截面圆弧形流管无阀压电泵的泵流量公式为

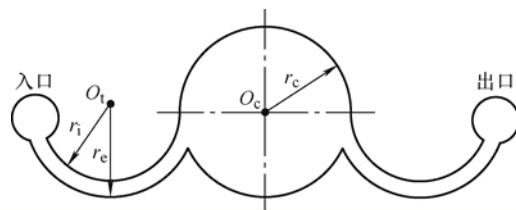
$$\Delta Q_2 = 8aS \sin(\Omega t) + \Delta V_Z f \frac{\xi_d - \xi_n}{\xi_d + \xi_n} \quad (29)$$

因此, 通过理论计算可知, 变截面圆弧形流管的输出流量要好于圆弧形流管无阀压电泵, 通过设计变截面圆弧形流管无阀压电泵有利于提升该类无阀压电泵的输出流量。

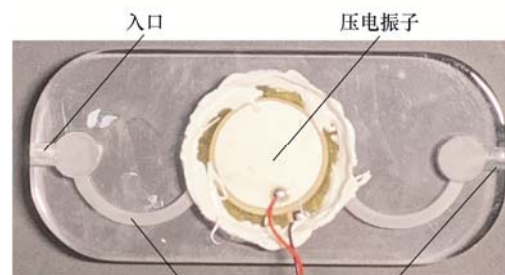
### 3 试验研究

为了验证圆弧形流管无阀压电泵和变截面圆弧形流管的输出性能, 制作了如图 5 和图 6 所示的圆弧形流管无阀压电泵和变截面圆弧形流管无阀压电泵。圆弧形流管深度为 1 mm, 内径  $r_{i1}=12$  mm, 外径  $r_{e1}=13$  mm, 泵腔半径  $r_{c1}=15$  mm, 深度为 1.5 mm; 变截面圆弧形流管的内径为  $r_{i2}=12$  mm, 流道外侧的圆心  $o_3$  与  $o_2$  的距离为  $\xi$  ( $\xi^2=a^2+b^2$ ;  $a=0.58$  mm, 为  $o_3$  与  $o_2$  竖直方向的距离;  $b=2.61$  mm, 为  $o_3$  与  $o_2$  水平方向的距离), 流道外侧半径  $r_{b2}=17.33$  mm, 泵

腔半径  $r_{c1}=15$  mm, 深度为 1.5 mm。压电振子基体由黄铜制成, 直径为 35 mm, 厚度为 0.18 mm; 压电陶瓷直径为 25 mm, 厚度为 0.25 mm。

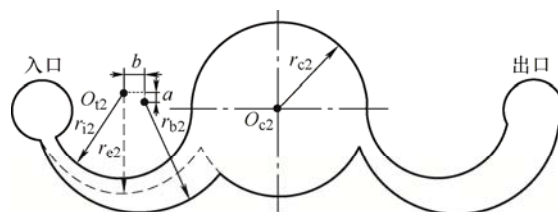


(a) 圆弧形流管无阀压电泵示意图

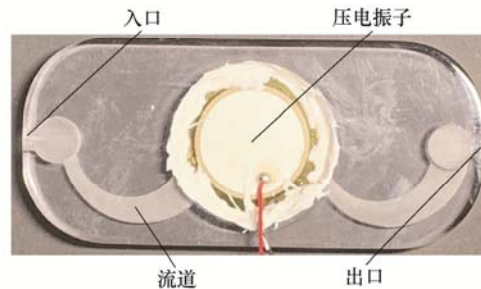


(b) 圆弧形流管无阀压电泵实物图

图 5 圆弧形流管无阀压电泵



(a) 变截面圆弧形流管无阀压电泵示意图



(b) 变截面圆弧形流管无阀压电泵实物图

图 6 变截面圆弧形流管无阀压电泵

为了简化制作过程、便于观察流管内部流动情况和避免液体泄漏, 本研究采用联泰 Lite 600 打印机制作了圆弧形流管无阀压电泵和变截面圆弧形流管无阀压电泵的泵体, 打印材料为无色透明树脂, 具体如图 5b 和 6b 所示。图 7 为压电泵流量试验照, 试验流体介质为蒸馏水。

图 8 所示为圆弧形流管无阀压电泵泵流量与驱动电压、驱动频率的关系。由图可知, 当驱动电压为 180~300 V 时, 泵流量均在驱动频率为 10 Hz 时达到峰值(图中红色曲线); 当驱动频率为 5~25 Hz

时, 泵流量均随驱动电压的增加而增加; 当驱动频率为 10 Hz、驱动电压为 300 V<sub>p-p</sub> 时, 泵流量达到最大, 为 1.76 mL/min。

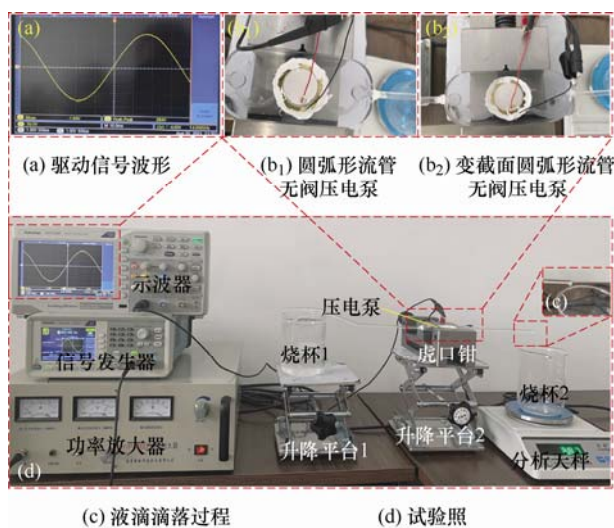


图 7 压电泵流量试验

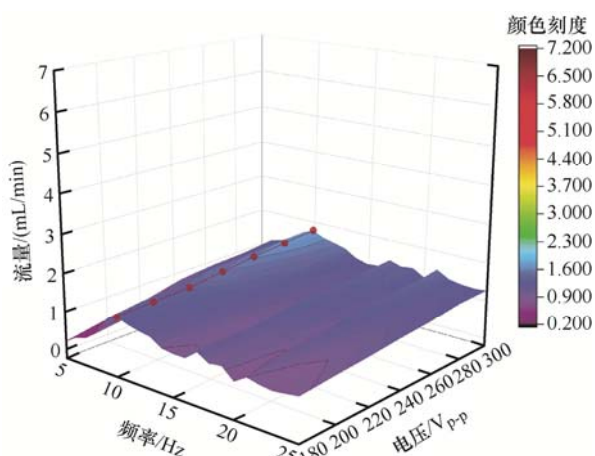


图 8 圆弧形流管无阀压电泵泵流量与驱动电压、驱动频率的关系

图 9 所示为变截面圆弧形流管无阀压电泵泵流量与驱动电压、驱动频率的关系。由图 9 可知, 当驱动电压为 180~300 V 时, 泵流量均在驱动频率为 14 Hz(图中黑色曲线)时达到峰值; 当驱动频率为 5~25 Hz 时, 泵流量均随驱动电压的增加而增加; 当驱动频率为 14 Hz、驱动电压为 300 V<sub>p-p</sub> 时, 泵流量达到最大, 为 7.2 mL/min。

通过对比变截面圆弧形流管无阀压电泵和圆弧形流管无阀压电泵的泵流量-驱动电压-驱动频率三维曲面图发现: 在哥氏力和锥形流管正、反流阻差的作用下, 变截面圆弧形流管无阀压电泵的泵流量显著增加。

为了进一步比较变截面圆弧形流管无阀压电泵

泵流量的增幅, 分别选取了圆弧形流管无阀压电泵和变截面圆弧形流管无阀压电泵的峰值频率点, 绘制了图 10 所示的不同电压下的泵流量增幅。由图 10 可知, 与圆弧形流管无阀压电泵相比, 变截面圆弧形流管无阀压电泵的输出流量有显著提升, 在驱动电压为 180 V<sub>p-p</sub> 时, 输出流量的增幅最低, 为 137%; 在驱动频率为 260 V<sub>p-p</sub> 时, 输出流量的增幅最高, 达到 320%。通过计算可知, 与圆弧形流管无阀压电泵相比, 变截面圆弧形流管无阀压电泵的输出流量平均增加了 235%。

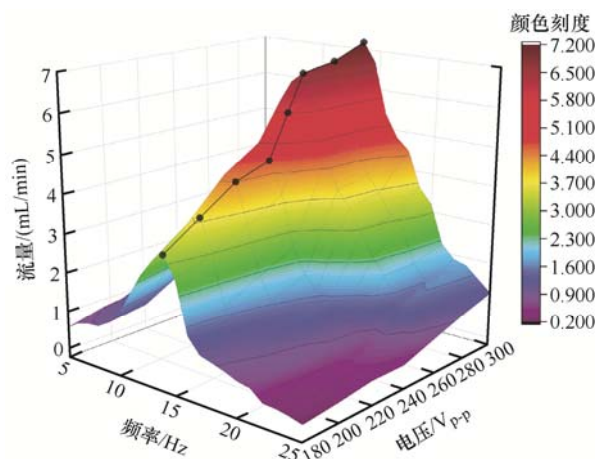


图 9 变截面圆弧形流管无阀压电泵泵流量与驱动电压、驱动频率的关系

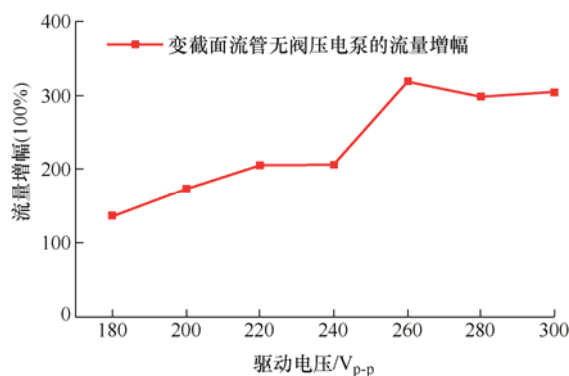


图 10 泵流量增幅与电压的关系

变截面流管无阀压电泵的泵流量大幅提升的原因如下。

通过前面的理论分析可知, 圆弧形流管无阀压电泵是在哥氏力的作用下产生顺、逆时针流速差形成液体的单向流动而产生输出流量的; 而变截面流管无阀压电泵在工作时不仅受到哥氏力的作用, 而且受到一个扩张/收缩管的作用, 二者共同作用下可以实现液体的单向流动, 同时结合式(28)和(29)可知, 其输出流量必定大于圆弧形流管无阀压电泵。

图 11 所示为驱动电压为  $300\text{ V}_{\text{p-p}}$ 、驱动频率为  $14\text{ Hz}$  时, 变截面圆弧形流管无阀压电泵的泵流量与圆弧内径  $r_{12}$  的关系。由图可知, 在驱动参数相同时, 泵流量随着圆弧内径  $r_{12}$  的增加而增加。流量增加的原因如下: 式(29)为变截面圆弧形流管无阀泵的流量公式, 圆弧内径  $r_{12}$  增加, 即公式中的参数  $a$  增加, 因为流量会增加。

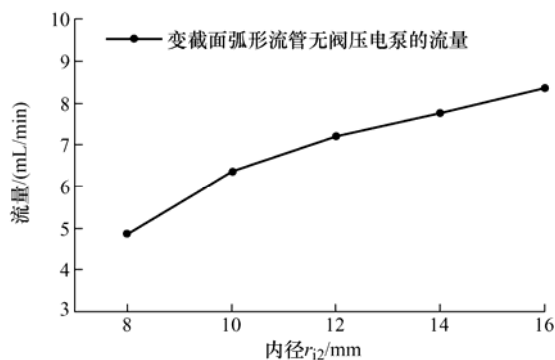


图 11 变截面圆弧形流管无阀压电泵的泵流量与内径的关系

## 4 结论

(1) 提出了一种结构简单、能够显著提升流量、可做成微纳米级尺度的变截面圆弧形流管无阀压电泵。

(2) 分析了流体在圆弧形流管中的流动特性, 推导了液体在圆弧形流管中顺、逆时针流动的流速差; 阐述了变截面圆弧形流管无阀压电泵的工作原理; 建立了泵流量方程。

(3) 利用 3D 打印技术分别制作了圆弧形流管无阀压电泵和变截面圆弧形流管无阀压电泵, 并进行了试验验证; 通过试验证明了变截面圆弧形流管无阀压电泵的输出性能要优于圆弧形流管无阀压电泵; 进而证明了理论分析的正确性, 为该泵在导航装置中的应用奠定基础。

## 参 考 文 献

- [1] DONG Jingshi, LIU Ruigang, LIU Weishuai, et al. Design of a piezoelectric pump with dual vibrators[J]. *Sensors and Actuators A: Physics*, 2017, 257: 165-172.
- [2] LI Hengyu, LIU Junkao, LI Kai, et al. A review of recent studies on piezoelectric pumps and their applications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 151: 107393.
- [3] WANG Daihua, PENG Yunhao, TANG Liankai, et al. A multi-chamber piezoelectric pump based on pumping unit

with double circular piezoelectric unimorph actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30: 095023.

- [4] ZHANG Jianhui, WANG Ying, HUANG Jun. Advances in valveless piezoelectric pump with cone-shaped tubes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30: 766-781.
- [5] YAN Qiufeng, YIN Yongkang, SUN Wanting, et al. Advances in valveless piezoelectric pumps[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 7016.
- [6] HUANG Jun, ZOU Lei, LI Zhongjie, et al. Development and performance comparison of valveless piezoelectric pumps with asymmetrical channels[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314: 112241.
- [7] 张建辉, 王大康, 王守印, 等. 压电泵的研究—泵阀滞后性[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(5): 107-110.  
ZHANG Jianhui, WANG Dakang, WANG Shouyin, et al. Research on piezoelectric pump—lagging of valve[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(5): 107-110.
- [8] STEMME E, STEMME G. A valveless diffuser/nozzle based fluid pump[J]. *Sensors and Actuators A: Physucal*, 1993, 39(2): 159-167.
- [9] SMITH L. Micromachined nozzles fabricated with a replicative method[C]//*Micromechanics Europe 1990 (MME 90)*, Berlin, Germany, November 26-27, 1990: 53-57.
- [10] AGGARWAL S, PAUL B E, DASGUPTA A, et al. Experimental characterization of piezoelectrically actuated micromachined silicon valve-less micropump[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2017, 21(1): 2.
- [11] GUAN Yanfang. Performance analysis of a microfluidic pump based on combined actuation of the piezoelectric effect and liquid crystal backflow effect[J]. *Micromachines*, 2019, 10(9): 584.
- [12] LEE S C, HUR S, KANG D, et al. The performance of bioinspired valve-less piezoelectric micropump with respect to viscosity change[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(3): 036006.
- [13] HE X H, ZHU J W, ZHANG X T, et al. The analysis of internal transient flow and the performance of valveless piezoelectric micropumps with planar diffuser/nozzle elements[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(1): 23-37.
- [14] HUANG Jun, ZHANG Jianhui, XUN Xianchao, et al. Theory and experimental verification on valve-less piezoelectric pump with multistage Y-shape treelike bifurcate tubes[J]. *Chinese Journal of Mechanical*

- Engineering, 2013, 26(3): 462-468.
- [15] HUANG Jun, ZOU Lei, LI Zhongjie, et al. Development and performance comparison of valve-less piezoelectric pumps with asymmetrical channels[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314: 112241.
- [16] ZHANG Jianhui, LENG Xuefei, ZHAO Chunsheng. A spiral-tube-type valveless piezoelectric pump with gyroscopic effect[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(16): 1885-1889.
- [17] 王颖, 张建辉, 刘志玲, 等. 螺旋形流管无阀压电泵的试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 239-245.
- WANG Ying, ZHANG Jianhui, LIU Zhiling, et al. Experimental studies on valveless piezoelectric pump with spiral flow tubes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4): 239-245.
- [18] FORSTER F K, BARDELL R L, AFROMOWITZ M A, et al. Design, fabrication and testing of fixed-valve micro-pumps[J]. ASME-PUBLICATIONS-FED, 1995, 234: 39-44.
- [19] HE Xiuhua, BIAN Rongqun, LIN Nan, et al. A novel valve-less piezoelectric micropump with a bluff-body based on Coanda effect[J]. Microsystem Technologies, 2019, 25(7): 2637-2647.
- [20] ZHANG Jianhui, XIA Qixiao, HUANG Yi, et al. Theory and experimental verification of valve-less piezoelectric pump with rotatable unsymmetrical slopes[J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 54(11): 3070-3077.
- [21] HE Lipeng, ZHAO Da, LI Wei, et al. Performance analysis of valve-less piezoelectric pump with dome composite structures[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(6).
- [22] 蔡军, 黄俊, 胡方军, 等. 锥形螺线泵腔并联无阀压电泵的试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(增刊 2): 29-32, 215.
- CAI Jun, HUANG Jun, HU Fangjun, et al. Research on valveless piezoelectric pump with parallel connection conical spiral cavity[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(Suppl.2): 29-32, 215.
- [23] JI Jing, ZHANG Jianhui, XIA Qixiao, et al. Theoretical analysis and experimental verification on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 595-605.
- [24] 张建辉, 曹炳鑫, 陈道根, 等. 半球缺阻流体无阀压电泵的试验验证[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 76-84.
- ZHAHNG Jianhui, CAO Bingxin, CHEN Daogen, et al. Experimental verification on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 76-84.
- [25] HUANG Yi, ZHANG Jianhui, HU Xiaoqi, et al. Dynamics analysis and experiment on the fishtailing type of valveless piezoelectric pump with rectangular vibrator[J]. Science China: Technological Sciences, 2010 (12): 3241-3247.
- [26] HU Xiaoqi, ZHANG Jianhui, HUANG Yi, et al. Principle and experimental verification of caudal-fin-type piezo-stack pump with variable-cross-section oscillating vibrator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(1): 128-136.
- [27] BAO Qibo, ZHANG Jianhui, TANG Ming, et al. A novel PZT pump with built-in compliant structures[J]. Sensors, 2019, 19, 1301.
- [28] HUANG Weiqing, LAI Liyi, CHEN Zhenlin, et al. Research on a piezoelectric pump with flexible valves[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 2909.
- [29] 唐娟, 张建辉, 张泉, 等. 圆弧形流管无阀压电泵的工作原理及试验[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2): 258-262, 397.
- TANG Juan, ZHANG Jianhui, ZHANG Quan, et al. Working principle and experimental verification of valve-less piezoelectric pump with arc-shaped tube[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2): 258-262, 397.
- [30] 张建辉, 王守印. 压电锥形流管无阀泵的研究—单向流动原理及泵流量[J]. 压电与声光, 2001, 23(1): 23-25.
- ZHANG Jianhui, WANG Shouyin. Study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based — fluid pump one-way flow principle and the pump flow[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(1): 23-25.

作者简介: 严秋锋(通信作者), 1988 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为压电泵、压电雾化器、压电驱动技术。

E-mail: yanqf@nuaa.edu.cn

孙婉婷, 女, 1987 年出生, 博士后。主要研究方向为金属结构设计以及强化机理分析, 金属表面激光加工工艺优化。

E-mail: w1sun@polyu.edu.uk

王红梅, 女, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为大气遥感, 数值分析。

E-mail: wanghongmei@ntu.edu.cn